МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.891 + 06 10.23947/1992-5980-2017-17-3-70-77

Расчетная модель упорного подшипника с пористым покрытием на поверхности направляющей*

М. А. Мукутадзе[1], А. Н. Гармонина[2], В. М. Приходько[3]**

[1,2,3]Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Design model of thrust bearing with porous coating on the way surface ***

M. A. Mukutadze[1], A. N. Garmonina[2], V. M. Prikhodko[3]**

[1,2,3]Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. Статья посвящена разработке расчетной модели упорного подшипника скольжения с двухслойным пористым покрытием на поверхности направляющей, работающего на электропроводящем смазочном материале. Целью работы являются: разработка и численное обоснование возможного увеличения маслоемкости, повышения несущей способности и уменьшения силы трения в результате уточнения их расчетных моделей. Это основано на формировании расчетных гидродинамических моделей упорных подшипников с учетом зависимости проницаемости пористых слоев на поверхности направляющей при установившемся течении электропроводящего жидкого смазочного материала.

Материалы и методы. Предложены новые математические модели, описывающие установившееся движение электропроводящего смазочного материала в рабочем зазоре между наклонным ползуном и направляющей с двухслойным пористым покрытием. Приведенный численный анализ основных рабочих характеристик показал, что подшипники с двухслойным пористым покрытием на поверхности направляющей, значительно повышают демпфирующие характеристики опор, несущую способность подшипника и уменьшают силу трения.

Результаты исследования. На основе уравнений установившегося движения электропроводящего несжимаемого жидкого смазочного материала для «тонкого слоя» в рабочем зазоре, неразрывности и Дарси при наличии электромагнитного поля, сформирована расчетная модель упорного подшипника скольжения с учетом проницаемости пористого покрытия на поверхности направляющей. Авторами найдено точное автомодельное решение упорного подшипника с двухслойным пористым покрытием на поверхности направляющей для поля скоростей и давлений в смазочном слое и пористом покрытии, а также многопараметрические выражения для основных рабочих характеристик подшипника, учитывающих наличие электромагнитных полей, проницаемость пористых слоев и отношение толщин пористых слоев.

Обсуждение и заключения. Полученные уточненные расчетные модели позволили установить влияние ряда дополнительных факторов, а также выполнить сравнительный анализ

Introduction. The development of the design model of a thrust sliding bearing with a two-layer porous coating on the way surface running on an electrically conductive lubricant is described. The work objectives are the development and computational justification of the possible increase in oil consumption, growth of the bearing capacity, and reduction of the frictional force, due to their design models refinement. This is based on the formation of the computed hydrodynamic models of thrust bearings taking into account the dependence of the porous layers permeability on the way surface under the steady flow of the electroconductive liquid lubricant.

Materials and Methods. New mathematical models that describe a steady flow of the electrically conductive lubricant in the working gap between an inclined slider and a guide with a bilayered porous coating are proposed. The given numerical analysis of the essential performance features has shown that bearings with a two-layer porous coating on the way surface significantly increase the damping characteristics of the supports and bearing capacity of the bearing, and reduce the frictional force.

Research Results. A design model of the thrust sliding bearing is formed taking into account the porous coating permeability on the way surface. That is based on the equations of the steady flow of the electrically conductive incompressible liquid lubricant for a “thin layer” in the working gap, continuity and Darcy in the presence of an electromagnetic field. The authors have found the exact self-similar solution to a thrust bearing with a two-layer porous coating on the way surface for the field of velocities and pressures in the lubricating layer and porous coating. Besides, multiparameter expressions for the essential bearing performance with the account for the availability of electromagnetic fields, the permeability of porous layers, and the ratio of the thicknesses of porous layers, are specified.

Discussion and Conclusions. The received updated calculation models have made it possible to determine the effect of a number of additional factors, as well as to perform a comparative analysis

*Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

**E-mail: murman1963@yandex.ru, Opatskih@yandex.ru, Vm_2@rgups.ru

***The research is done within the frame of the independent R&D.

вновь полученных результатов и уже имеющихся, что подтверждает большую приближенность новой модели к реальной практике. Расчетные модели обеспечивают необходимые инженерные проектировочные вычисления в достаточно широком диапазоне скоростей и нагрузок для применения в машиностроении, авиастроении, приборостроении и т.д.

of the newly obtained results and those already available which confirms the close approximation of the new model to the actual practice. The theoretical models provide the necessary engineering design calculations in a sufficiently wide range of speeds and loads for the application in engineering, aircraft building, instrument making, etc.

Ключевые слова: электропроводимость смазочного материала, проницаемость пористых слоев, наклонный ползун и направляющая, двухслойное пористое покрытие направляющей.

Keywords: electrical conductivity of lubricant, permeability of porous layers, inclined slide and guide, two-layer porous guide coating.

Образец для цитирования: Мукутадзе, М. А. Расчетная модель упорного подшипника с пористым покрытием на поверхности направляющей / М. А. Мукутадзе, А. Н. Гармонина, В. М. Приходько // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т.17, № 3. — С. 70–77.

For citation: M.A. Mukutadze, A. N. Garmonina, V. M. Prikhodko. Design model of thrust bearing with porous coating on the way surface. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, p. 70–77.

Введение. Одним из важных конструктивных элементов подшипников жидкостного трения является смазочная среда. В современных машинах широко используются пористые покрытия, наносимые газотермическим напылением, обладающие более высокой маслоемкостью и демпфирующей способностью. В последнее время в качестве смазочной среды используются жидкости, обладающие электропроводящими свойствами. Анализ существующих работ в данном направлении [1–10], в которых сравнивались характеристики подшипников, работающих на электропроводящих смазочных материалах с пористым покрытием на поверхности направляющей, подтвердил эффект возрастания толщины смазочной пленки по сравнению с подшипниками, работающими на обычных смазочных материалах. Результаты работ, посвященных расчету подшипников скольжения с пористым покрытием из пористых псевдосплавов, подтверждают, что в приведенных расчетах не учитывается многослойность пористых слоев и электропроводность смазочного материала.

Постановка задачи. Рассматривается ламинарное течение электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре упорного подшипника скольжения с наклонным вкладышем, работающего в режиме гидродинамического смазывания, с двухслойным пористым покрытием на поверхности направляющей. Предполагается, что вкладыш неподвижен, а направляющая движется в сторону сужения зазора с постоянной скоростью u^*. Вектор магнитной индукции $\bar{B}'$ и вектор напряженности электрического поля $\bar{E}'$ направлены так, как показано на рис. 1.

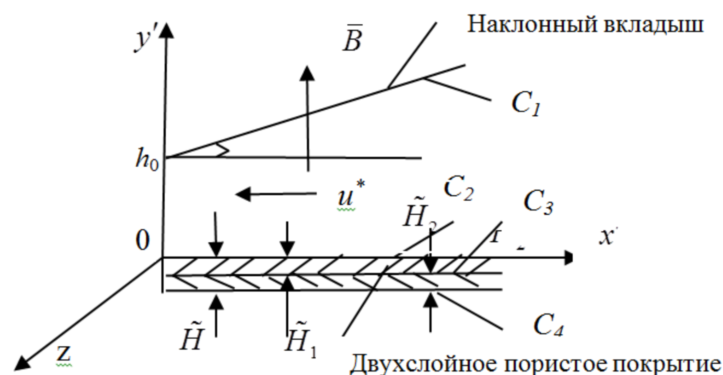


Рис. 1. Рабочая схема

Fig. 1. Functional diagram

В декартовой системе координат уравнения ползуна C_1 и направляющей с двухслойным пористым покрытием на ее поверхности запишем в виде:

$$y' = h_0 + x'tg\alpha\,,\;\; y' = 0\,,\;\; y' = -\tilde{H}\,,\;\; y' = -\tilde{H}_1, \qquad (1)$$

где $\tilde{H}_1$ — толщина пористого слоя, прилегающего к направляющей; $\tilde{H}$ — толщина двухслойного пористого покрытия; h_0 — толщина смазочной пленки в начальном сечении; α — угол наклона ползуна к оси *Ox*.

Предполагается, что h_0 значительно меньше длины ползуна.

Исходные уравнения и граничные условия.

Движение электропроводящего жидкого смазочного материала в рабочем зазоре между наклонным ползуном и направляющей описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial^2 v_{x'}}{\partial y'^2} = \frac{1}{\mu'}\frac{dp'}{dx'} - \frac{1}{\mu'}\sigma' B\left(E_z - B v_{x'}\right), \tag{2}$$

где μ' — вязкость смазочного материала; p' — давление в смазочном слое; σ' — электропроводность смазочного материала; $\bar{B}' = \{0, B_y, 0\}$ — вектор магнитной индукции; $\bar{E}' = \{0, 0, E_z\}$ — вектор напряженности электрического поля; B — составляющая вектора магнитной индукции; E_z — составляющая вектора напряженности электрического поля. При анализе рассматриваемой задачи в качестве исходных уравнений берутся система уравнений (2), а также уравнения неразрывности и Дарси для случая «тонкого слоя».

$$\frac{\partial^2 v_{x'}}{\partial y'^2} = \frac{1}{\mu'}\frac{dp'}{dx'} - \frac{1}{\mu'}\sigma' B\left(E_z - B v_{x'}\right), \quad \frac{\partial v_{x'}}{\partial x'} + \frac{\partial v_{y'}}{\partial y'} = 0, \quad \frac{\partial^2 P'}{\partial x'^2} + \frac{\partial^2 P'}{\partial y'} = 0, \tag{3}$$

где $v_{x'}, v_{y'}$ — компоненты вектора скорости, P' — давление в пористом слое.

При этом значения $\bar{B}' = \{0, B_y, 0\}$ и $\bar{E}' = \{0, 0, E_z\}$ считаются заданными и удовлетворяющими уравнениям Максвелла:

$$\mathrm{div}\bar{B}' = 0, \quad \mathrm{rot}\bar{E}' = 0.$$

Величины E', B' и скорости течения электропроводящей жидкости таковы, что можно пренебречь влиянием потока на электрическое и магнитное поля.

Система уравнений (3) решается при следующих граничных условиях:

$$v_{x'} = 0, \ v_{y'} = 0 \text{ при } y' = h_0 + x'\mathrm{tg}\alpha; \ v_{x'} = -u^*, \ v_{y'} = 0 \text{ при } y = 0;$$

$$p'(0) = p'(L) = p_a, \ \frac{\partial P_2}{\partial y'^2} = 0 \text{ при } y = -\tilde{H}; -\frac{k_1'}{\mu'}\frac{\partial p_1}{\partial y}\Big|_{y=0} = v_y\Big|_{y=0}, \ p_1 = P \text{ при } y = 0$$

$$p_1 = p_2 \text{ при } y = -\tilde{H}_1; \ \frac{\partial p_1}{\partial y} = \frac{k_2}{k_1}\frac{\partial P_2}{\partial y} \text{ при } y = -\tilde{H}_1. \tag{4}$$

Для описания процессов в смазочном и пористом слоях размерные величины связаны с соответствующими безразмерными следующими соотношениями:

— в смазочном слое:

$$v_{y'} = \varepsilon u^* u, \ v_{x'} = u^* v, \ \varepsilon = \frac{h_0}{L}, \ y = h_0 y', \ x = Lx', \ p = p^* p', \ p^* = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}, \ \sigma' = \sigma, \ \mu' = \mu; \tag{5}$$

— в пористом слое:

$$x = Lx^*, \ y = Ly^*, \ P = P^* P', \ k_1' = k_1, \ k_2' = k_2, \ P_1 = P^* P_1, \ P_2 = P^* P_2. \tag{6}$$

Подставляя (5)–(6) в уравнение (3), опуская штрихи при безразмерных переменных, приходим к следующему выражению:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{dp}{dx} + Nv - A, \quad \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial y^{*2}} + \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = 0. \tag{7}$$

Здесь $B_y = B = \mathrm{const}$, $E_z = E = \mathrm{const}$, $N = \frac{\sigma' B h_0^2}{\mu' u^*}$ — число Гартмана, $A = \frac{\sigma' B E h_0^2}{\mu' u^*}$ — величина, обусловленная наличием электрического поля.

Система уравнений (7) решается при следующих граничных условиях:

— в смазочном слое:

$$v = 0, \ u = 0 \text{ при } y = 1 + \eta x = h(x), \ v = -1 \text{ при } y = 0, \ p(0) = p(1) = \frac{p_a}{p^*}; \tag{8}$$

— в пористом слое:

$$u\Big|_{y^*=0} = \widetilde{M}_1 \frac{\partial P_1}{\partial y^*}\Big|_{y^*=0}, \quad \frac{\partial P_2}{\partial y^*}\Big|_{y^*=-\frac{\widetilde{H}}{L}} = 0, \quad p_1 = P \text{ при } y^* = 0;$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial y^*}\Big|_{y^*=-\frac{\widetilde{H}_1}{L}} = \frac{k_2}{k_1}\frac{\partial P_2}{\partial y^*}\Big|_{y^*=-\frac{\widetilde{H}_1}{L}}, \quad P_1 = P_2\Big|_{y^*=-\frac{\widetilde{H}_1}{L}}, \tag{9}$$

где $\eta = \dfrac{Ltg\alpha}{h_0}$, $\widetilde{M}_1 = -\dfrac{k_1 L}{h_0^3}$

Заменяя в первом уравнении системы (7) скорость v ее максимальным значением, равным 1, точное автомодельное решение задачи, связанное с определение поля скоростей и давлений в смазочном слое, будем искать в виде:

$$v = \frac{\partial\psi}{\partial y} + V(x,y),\ u = -\frac{\partial\psi}{\partial x} + U(x,y),\ v(x,y) = \widetilde{v}(\xi),\ u(x,y) = -\widetilde{u}(\xi)h'(x),$$

$$\frac{dp}{dx} - N - A = \frac{\widetilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\widetilde{C}_2}{h^3(x)},\ \psi = \widetilde{\psi}(\xi),\ \xi = \frac{y}{h(x)}. \tag{10}$$

Подставляя (10) в (7) с учетом граничных условий (8)–(9), получим:

$$\psi''' = \widetilde{C}_2,\ \widetilde{v}'' = \widetilde{C}_1,\ \widetilde{u}' + \xi\widetilde{v}' = 0,\ \widetilde{u} = 0,\ \widetilde{v} = 0 \text{ при } \xi = 1,\ \widetilde{\psi}' = 0 \text{ при } \xi = 0,\ \xi = 1,$$

$$\widetilde{v} = 1 \text{ при } \xi = 0,\ \widetilde{u}\Big|_{y^*=0} = \widetilde{M}_1 \frac{\partial P_1}{\partial y^*}\Big|_{y^*=0}. \tag{11}$$

Решение задачи (10) с учетом граничных условий (11) находится непосредственным интегрированием:

$$\widetilde{v} = \frac{\widetilde{C}_1\xi^2}{2} - \left(\frac{\widetilde{C}_1\xi}{2} + 1\right)\xi + 1,\ \widetilde{\psi} = \frac{\widetilde{C}_2}{2}\left(\xi^2 - \xi\right). \tag{12}$$

Определение гидродинамического давления

Давление в смазочном слое находим из уравнения:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{\widetilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\widetilde{C}_2}{h^3(x)} + (N + A). \tag{13}$$

Интегрируя уравнение (13), получим

$$p = \widetilde{C}_1\left(x - \eta x^2\right) + \widetilde{C}_2\left(x - \frac{3}{2}\eta x^2\right) + (N + A)x + \frac{p_a}{p^*}. \tag{14}$$

Используя граничные условия $p(0) = p(1) = \dfrac{p_a}{p^*}$ и решая уравнение с точностью до членов $O\left(\eta^2\right)$, получим

$$\widetilde{C}_2 = -(N + A)\left(1 + \frac{3}{2}\eta\right) - \widetilde{C}_1\left(1 + \frac{1}{2}\eta x^2\right). \tag{15}$$

С учетом (15) для p получим следующее выражение:

$$p = \frac{1}{2}\eta\left(x^2 - x\right)\left(3(N + A) + \widetilde{C}_1\right) + \frac{p_a}{p^*}. \tag{16}$$

С учетом (16) давление фильтрующегося смазочного материала в пористых слоях будем искать в виде:

$$p_i(x, y^*) = R_i\left(y^*\right) + \frac{1}{2}\eta\left(x^2 - x\right)\left(3(N + A) + \widetilde{C}_1\right) + \frac{p_a}{p^*}. \tag{17}$$

Подставляя (17) в уравнение Дарси для определения функции $R_i\left(y^*\right)$, приходим к следующему дифференциальному уравнению и граничным условиям:

$$R_i''\left(y^*\right) + (3(N + A) + \widetilde{C}_1)\eta = 0,\quad i = 1,2; \tag{18}$$

$$R_1(0) = 0\ \ R_1\left(-\frac{\widetilde{H}_1}{L}\right) = R_2\left(-\frac{\widetilde{H}_1}{L}\right),\ R_1'\left(-\frac{\widetilde{H}_1}{L}\right) = \frac{k_2}{k_1}R_2'\left(-\frac{\widetilde{H}_1}{L}\right),\ R_2'\left(-\frac{\widetilde{H}}{L}\right) = 0. \tag{19}$$

Решение задачи (18) с учетом граничных условий (19) находим непосредственным интегрированием. В результате получим:

$$R_1(y^*) = \eta\left(\tilde{C}_1 + 3(N+A)\right)\left(-\frac{y^*}{2} - y^*\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right)\right)$$

$$R_2(y^*) = \eta\left(\tilde{C}_1 + 3(N+A)\right)\left(-\frac{y^{*2}}{2} - y^*\frac{\tilde{H}}{L} + \frac{\tilde{H}_1\tilde{H}_2}{L^2}\left(\frac{k_2}{k_1} - 1\right)\right) \qquad (20)$$

Тогда $P_1 = \eta\left(\tilde{C}_1 + 3(N+A)\right)\left(-\frac{y^{*2}}{2} - y^*\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right) + \frac{1}{2}\left(x^2 - x\right)\right) + \frac{p_a}{p^*}$

$$P_2 = \eta\left(\tilde{C}_1 + 3(N+A)\right)\left(-\frac{y^{*2}}{2} - y^*\frac{\tilde{H}}{L} + \frac{\tilde{H}_1\tilde{H}_2}{L^2}\left(\frac{k_2}{k_1} - 1\right) + \frac{1}{2}\left(x^2 - x\right)\right) + \frac{p_a}{p^*}$$

Таким образом, решение задачи будет найдено после определения константы $\tilde{C}_1$. Интегрируя уравнение неразрывности по ξ от 0 до 1

$$\tilde{M}\frac{\partial P_1}{\partial y}\bigg|_{y^*=0} = \int_0^1 \tilde{v}(\xi)d\xi \qquad (21)$$

с учетом (12) и (20) для $\tilde{C}_1$, получим следующее выражение:

$$\tilde{M}_1\left(3(N+A) + \hat{C}_1\right)\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right) = -\frac{\tilde{C}_1}{12} + \frac{1}{2} \qquad (22)$$

Решая уравнение (22) относительно $\tilde{C}_1$, будем иметь:

$$\tilde{C}_1 = \frac{6\left(1 + 6\tilde{M}_1(N+A)\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right)\right)}{1 - 12\tilde{M}_1\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right)}, \qquad (23)$$

Итак, уравнение (16) с учетом (23) можно представить в виде:

$$P = \frac{1}{2}\eta\left(x^2 - x\right)\left(3(N+A) + \frac{6\left(1 + 6\tilde{M}_1(N+A)\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right)\right)}{1 - 12\tilde{M}_1\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right)}\right) + \frac{p_a}{p^*}. \qquad (24)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Перейдем к определению основных рабочих характеристик подшипника. С учетом (12) и (24) для несущей способности и силы трения получим следующие выражения:

$$W = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}\int_0^1\left(P - \frac{p_a}{p^*}\right)dx = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}\left(-\frac{(N+A)}{4} + \frac{1 + 6\tilde{M}(N+A)\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right)}{\left(24\tilde{M}_1\left(\frac{k_2}{k_1}\frac{\tilde{H}_2}{L} + \frac{\tilde{H}_1}{L}\right) - 2\right)}\right);$$

$$L_{\text{тр}} = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}\int_0^1\left(\frac{\psi''(0)}{h^2(x)} - \frac{\tilde{v}'(0)}{h^3(x)}\right)dx = \frac{\mu u^* L}{h_0^2}\left(\frac{(N+A)}{2}\left(1 + \frac{\eta}{2}\right) + \frac{\tilde{C}_1\eta}{2} + 1 - \frac{3}{2}\eta\right). \qquad (25)$$

Для проверочных расчетов на основе полученных теоретических моделей использованы следующие их значения:

p_a = 0,08÷0,101325 МПа; h_0 = 10^{-7}÷$2\cdot10^{-6}$ м; L = 0,1256÷0,1884 м;

μ = 0,0608 Нс/м^2 ; u^* = 1÷3 м/с; A = 0,1÷2; N =0,1÷0,9; p = 0÷16 МПа;

η = 0,3÷1; $\frac{k_2}{k_1}$ = 0,1÷0,9; $\tilde{H}_2 / \tilde{H}_1$ = 0,5÷2.

Результаты численных расчетов приведены на рисунках 2–5.

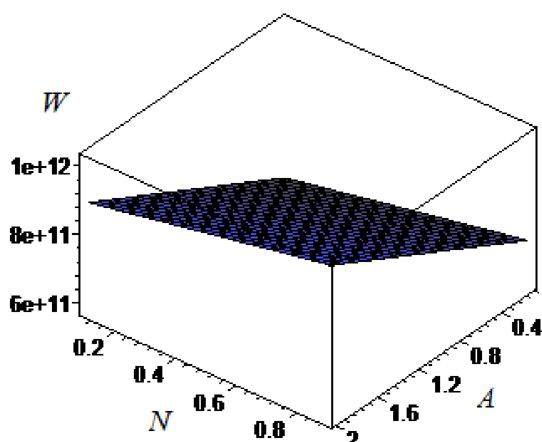


Рис. 2. График зависимости несущей способности от параметра *A*, обусловленного наличием электрического поля и *N,* числа Гартмана

Fig. 2. Dependency graph of bearing capacity on A parameter due to the presence of electric field and N, Hartmann number

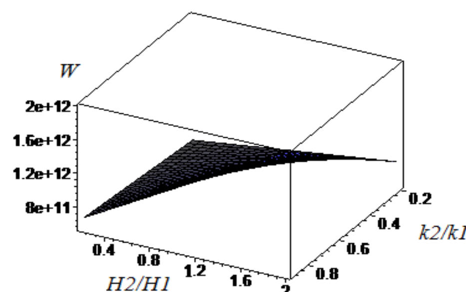


Рис. 3. График зависимости несущей способности от (k_2/k_1) отношения проницаемости пористых слоев и (H_2/H_1) отношение толщины пористых слоев

Fig. 3. Dependency graph of bearing capacity on (k_2/k_1) penetrability ratio of porous layers and (H_2/H_1) ratio of porous layers thickness

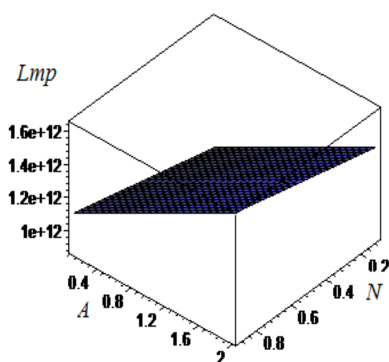


Рис. 4. График зависимости силы трения от параметра (*A*), обусловленного наличием электрического поля и (*N*) числа Гартмана

Fig. 4. Dependency graph of friction force on (A) parameter due to the presence of electric field and (N), Hartmann number

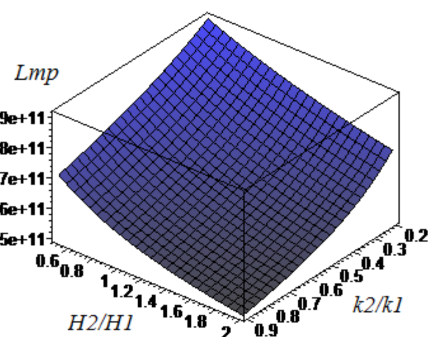


Рис. 5. График зависимости силы трения от (k_2/k_1) отношения проницаемости пористых слоев и (H_2/H_1) отношения толщины пористых слоев

Fig. 5. Dependency graph of friction force on (k_2/k_1) penetrability ratio of porous layers and (H_2/H_1) ratio of porous layers thickness

Выводы

Численный анализ полученных расчетных моделей и построенных на его основе графиков для упорного подшипника скольжения с двухслойным покрытием на поверхности направляющей позволил установить:

1. Подшипники с двухслойным покрытием на поверхности направляющей значительно повышают демпфирующие характеристики опор и несущую способность подшипника с увеличением отношения проницаемости пористых слоев (k_2/k_1) и толщины пористых слоев ($\tilde{H}_2 / \tilde{H}_1$), при этом сила трения существенно уменьшается.

2. Существенный рост несущей способности (≈2,5 раза) наблюдается при варьировании величины числа Гартмана *(N)*, так же, как и величины (*A*,) обусловленной наличием электрического поля.

3. С увеличением величины числа Гартмана *(N)* и величины *(A),* обусловленной наличием электрического поля, сила трения остается практически неизменной.

Библиографический список

1. Лагунова, Е. О. Нелинейные эффекты воздействия электропроводящей смазки на шип подшипника, обладающего демпфирующими свойствами / Е. О. Лагунова, А. Н. Гармонина, Е. А. Копотун // Сборка в машиностроении и приборостроении. — 2016. — № 3. — С. 40–46.

2. Гармонина, А. Н. Расчетная модель электропроводящей смазки радиального подшипника с демпфирующими свойствами при наличии электромагнитных полей / А. Н. Гармонина // Вестник РГУПС. — 2015. — № 3. — С. 121–127.

3. Akhverdiev, K.S. Radial bearing with porous barrel / K.S. Akhverdiev, M.A. Mukutadze, A.M. Mukutadze // Proceedings of Academic World : International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. — IRAG Research Forum : Institute of Research and Journals, 2016. — P. 28–31.

4. Разработка расчетной модели радиального подшипника с учетом зависимости проницаемости, электропроводности и вязкости жидкого смазочного материала от давления / К. С. Ахвердиев, М. А. Мукутадзе, И. А. Колобов, А. Н. Гармонина // Науковедение. — 2016. — Т.8, № 6. — С.1–18.

5. Mukutadze, A.M. Coefficient of a rolling motion bearing drive / A.M. Mukutadze // Procedia Engineering. — 2016. — No. 150. — P. 547–558.

6. Akhverdiev, K.S. Damper with porous anisotropic ring / K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // Mechanical Engineering Research. — 2016. — Vol. 6, No. 2. — P. 1–10.

7. Akhverdiev, K.S. Research of Drive Factor of Damper with Doble-Layer Porous Ringwith Compound Feed of Lubricant Material / K.S. Akhverdiev, A.M. Mukutadze // International Journal of Engineering Research. — 2017. — No. 1 — P. 76–85.

8. Mukutadze, M.A. Radial bearings with Porous Elements / M. A. Mukutadze // Procedia Engineering. — 2016. — No. 150. — P. 559–570.

9. Демпфер с пористым элементом для подшипниковых опор / К.С. Ахвердиев, А.М. Мукутадзе, Н.С. Задорожная, Б.М. Флек // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 4. — С. 502–509.

10. Расчетная модель составного цилиндрического подшипника, работающего в устойчивом режиме, при неполном заполнении смазочным материалом зазора / К. С. Ахвердиев, Н. С. Задорожная, А. М. Мукутадзе, Б. М. Флек // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 2016. — № 3. — С. 64–69.

References

1. Lagunova, E.O., Garmonina, A.N., Kopotun, E.A. Nelineynye effekty vozdeystviya elektroprovodyashchey smazki na ship podshipnika, obladayushchego dempfiruyushchimi svoystvami. [Nonlinear action effects electrically conductive lubricant on the bearing spike possessing damping properties.] Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making, 2016, no. 3, pp. 40–46 (in Russian).

2. Garmonina, A.N. Raschetnaya model' elektroprovodyashchey smazki radial'nogo podshipnika s dempfiruyushchimi svoystvami pri nalichii elektromagnitnykh poley. [Computational model of electrical conductive grease radial bearing with damping properties in existence of electromagnetic fields.] Vestnik RGUPS, 2015, no. 3, pp. 121–127 (in Russian).

3. Akhverdiev, K.S., Mukutadze , M.A., Mukutadze, A.M. Radial bearing with porous barrel. Proceedings of Academic World: International Conference, 28th of March, 2016, San Francisco, USA. IRAG Research Forum: Institute of Research and Journals, 2016, pp. 28–31.

4. Akhverdiev, K.S., Mukutadze , M.A., Kolobov, I.A., Garmonina, A.N. Razrabotka raschetnoy modeli radial'nogo podshipnika s uchetom zavisimosti pronitsaemosti, elektroprovodnosti i vyazkosti zhidkogo smazochnogo materiala ot davleniya. [Development of design model of a radial bearing taking into account dependence of permeability, electrical conductivity and viscosity of liquid lubricant on pressure.] Naukovedenie, 2016, vol. 8, no. 6, pp.1–18 (in Russian).

5. Mukutadze, A.M. Coefficient of a rolling motion bearing drive. Procedia Engineering, 2016, no. 150, pp. 547–558.

6. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, A.M. Damper with porous anisotropic ring. Mechanical Engineering Research, 2016, vol. 6, no. 2, pp. 1–10.

7. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, M.A. Research of Drive Factor of Damper with Doble-Layer Porous Ringwith Compound Feed of Lubricant Material. International Journal of Engineering Research, 2017, no. 1, pp. 76–85.

8. Mukutadze, M.A. Radial bearings with Porous Elements. Procedia Engineering, 2016, no. 150, pp. 559–570.

9. Akhverdiev, K.S., Mukutadze, A.M., Zadorozhnaya, N.S., Fleck, B.M. Dempfer s poristym elementom dlya podshipnikovykh opor. [Damper with a porous element for bearing assemblies.] Friction and Wear, 2016, vol. 37, no. 4, pp. 502–509 (in Russian).

10. Akhverdiev, K.S., Zadorozhnaya, N.S., Mukutadze, A.M., Fleck, B.M. Raschetnaya model' sostavnogo tsilindricheskogo podshipnika, rabotayushchego v ustoychivom rezhime, pri nepolnom zapolnenii smazochnym materialom

zazora. [Computation model of composite cylindrical bearing working in steady-state regime for partial filling of gap with lubricant material.] Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2016, no. 3, pp. 64–69 (in Russian).

Поступила в редакцию 07.07.2017
Сдана в редакцию 07.07.2017
Запланирована в номер 17.07.2017

Received 07.07.2017
Submitted 07.07.2017
Scheduled in the issue 17.07.2017

Об авторах:

Мукутадзе Мурман Александрович,
доцент кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), доктор технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2810-3047
murman1963@yandex.ru

Гармонина Анастасия Николаевна,
соискатель кафедры «Высшая математика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2),
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7370-4012
Opatskih@yandex.ru

Приходько Виктор Маркович,
заведующий кафедрой «Начертательная геометрия и графика» Ростовского государственного университета путей сообщения (РФ, 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2), доктор технических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0907-9320
Vm_2@rgups.ru

Authors:

Mukutadze, Murman A.,
associate professor of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Dr.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0003-2810-3047
OPM@rgups.ru

Garmonina, Anastasia N.,
Ed D candidate of the Higher Mathematics Department, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Dr.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-7370-4012
Opatskih@yandex.ru

Prikhodko, Victor M.,
head of the Descriptive Geometry and Engineering Graphics, Rostov State Transport University (RF, 344038, Rostov-on-Don, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., 2), Dr.Sci. (Eng.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0907-9320
Vm_2@rgups.ru